

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

PCT/JP2004/600183

14. 1. 2004

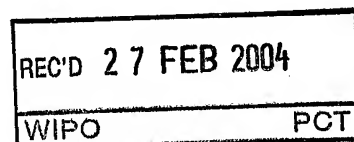
別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日
Date of Application: 2003年1月17日

出願番号
Application Number: 特願2003-010168
[ST. 10/C]: [JP2003-010168]

出願人
Applicant(s): サンケン電気株式会社

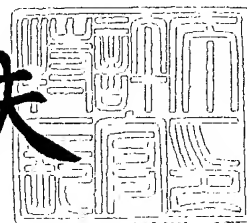


PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年2月13日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



出証番号 出証特2004-3008993

【書類名】 特許願

【整理番号】 T0227

【提出日】 平成15年 1月17日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H01L

【発明者】

【住所又は居所】 埼玉県新座市北野三丁目 6 番 3 号 サンケン電気株式会
社内

【氏名】 柳原 将貴

【発明者】

【住所又は居所】 埼玉県新座市北野三丁目 6 番 3 号 サンケン電気株式会
社内

【氏名】 佐藤 雅裕

【発明者】

【住所又は居所】 埼玉県新座市北野三丁目 6 番 3 号 サンケン電気株式会
社内

【氏名】 空 哲次

【特許出願人】

【識別番号】 000106276

【氏名又は名称】 サンケン電気株式会社

【代理人】

【識別番号】 100072154

【住所又は居所】 東京都新宿区百人町 2 - 5 - 8 科研ビル

【弁理士】

【氏名又は名称】 高野 則次

【電話番号】 03-3362-0032

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 059754

【納付金額】 21,000円

**【提出物件の目録】****【物件名】** 明細書 1**【物件名】** 図面 1**【物件名】** 要約書 1**【包括委任状番号】** 9702387**【その他】** 国等の委託研究の成果に係る特許出願（平成 1 3 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構基盤技術研究促進事業に係る委託研究、産業活力再生特別措置法第 3 0 条の適用を受けるもの）**【プルーフの要否】** 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 半導体装置及びその製造方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 窒化物系化合物半導体を有する半導体装置であって、
シリコン又はシリコン化合物から成る基板と、
前記基板の一方の主面上に配置されバッファ層と、
前記バッファ層の上に配置された少なくとも 1 つの窒化物系化合物半導体層を
含んでいる半導体素子用半導体領域と、
前記半導体素子用半導体領域の表面上に配置された第 1 の主電極、第 2 の主電極
及び制御電極とを備え、

前記バッファ層は、

化学式 $A l_x M_y G a_{1-x-y} N$

ここで、前記 M は、In（インジウム）と B（ボロン）とから選択された少なくとも 1 種の元素、

前記 x 及び y は、 $0 < x \leq 1$ 、

$0 \leq y < 1$ 、

$x + y \leq 1$

を満足する数値、

で示される材料から成る第 1 の層と、

化学式 $A l_a M_b G a_{1-a-b} N$

ここで、前記 M は In（インジウム）と B（ボロン）とから選択された少なくとも 1 種の元素、

前記 a 及び b は、 $0 \leq a \leq 1$ 、

$0 \leq b < 1$ 、

$a + b \leq 1$

を満足させる数値、

で示される材料から成る第 2 の層と、

前記第 1 の層と前記第 2 の層との間に配置され且つ 2 次元ガスの発生を抑制することができる材料からなり且つ 0.5～50 nm の厚さを有している第 3 の層

と

の複合層とから成ることを特徴とする半導体装置。

【請求項 2】 前記第 1 の層は $Al_xGa_{1-x}N$ から成り、

前記第 2 の層は、 $Al_aGa_{1-a}N$ から成ることを特徴とする請求項 1 記載の半導体装置。

【請求項 3】 前記第 1 の層は $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ から成り、前記第 2 の層は、 $Al_aIn_bGa_{1-a-b}N$ から成り、前記第 1 及び第 2 の層の少なくとも一方に In （インジウム）が含まれていることを特徴とする請求項 1 記載の半導体装置。

【請求項 4】 前記第 1 の層は、 $Al_xB_yGa_{1-x-y}N$ から成り、前記第 2 の層は、 $Al_aB_bGa_{1-a-b}N$ から成り、前記第 1 及び第 2 の層の少なくとも一方に B （ボロン）が含まれていることを特徴とする請求項 1 記載の半導体装置。

【請求項 5】 前記第 1 の層の格子定数は、第 2 の層の格子定数よりも小さいことを特徴とする請求項 1 又は 2 又は 3 又は 4 記載の半導体装置。

【請求項 6】 前記第 2 の層は Al を含まないか、又は Al の組成比が前記第 1 の層の組成比よりも小さいことを特徴とする請求項 1 記載の半導体装置。

【請求項 7】 前記第 3 の層の厚みは、前記第 1 の層の厚みよりも小さいことを特徴とする請求項 1 又は 2 又は 3 又は 4 記載の半導体装置。

【請求項 8】 前記第 3 の層は、前記第 2 の層と同一半導体材料から成り、導電型決定不純物として p 型不純物を含むことを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれかに記載の半導体装置。

【請求項 9】 前記第 3 の層は、 $0.5 \sim 5 \text{ nm}$ の厚さの絶縁層から成ることを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれかに記載の半導体装置。

【請求項 10】 前記絶縁層は、 SiN 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Ti_2O_3 、 ZrO_2 及び Ta_2O_5 から選択された少なくとも 1 つからなることを特徴とする請求項 9 記載の半導体装置。

【請求項 11】 前記バッファ層は、前記第 1 及び第 2 の層を複数有し、前記第 3 の層を少なくとも 1 つ有し、複数の前記第 1 及び第 2 の層が交互に積層され、複数の前記第 1 及び第 2 の層の相互間の内の少なくとも 1 つに前記第 3 の層

が配置されていることを特徴とする請求項 1 乃至 10 のいずれかに記載の半導体装置。

【請求項 12】 前記バッファ層における前記第 1 の層の厚みが $0.5\text{ nm} \sim 50\text{ nm}$ 及び前記第 2 の層の厚みが $0.5\text{ nm} \sim 200\text{ nm}$ であることを特徴とする請求項 1 乃至 11 のいずれかに記載の半導体装置。

【請求項 13】 前記基板の前記バッファ層が配置されている側の主面は、ミラー指数で示す結晶の面方位において (111) ジャスト面又は (111) 面から -4 度から $+4$ 度の範囲で傾いている面であることを特徴とする請求項 1 乃至 12 のいずれかに記載の半導体装置。

【請求項 14】 前記窒化物系化合物半導体層は、 GaN (窒化ガリウム) 層、 AlInN (窒化インジウム アルミニウム) 層、 AlGaInN (窒化ガリウム アルミニウム インジウム) 層、及び AlInGaInN (窒化ガリウム インジウム アルミニウム) 層から選択されたものであることを特徴とする請求項 1 乃至 13 のいずれかに記載の半導体装置。

【請求項 15】 前記半導体領域は、電界効果トランジスタを形成するための複数の半導体層から成り、前記第 1 の主電極はソース電極であり、前記第 2 の主電極はドレイン電極であり、前記制御電極はゲート電極であることを特徴とする請求項 1 乃至 14 のいずれかに記載の半導体装置。

【請求項 16】 前記半導体領域は、高電子移動度トランジスタ (HEMT) を形成するための複数の半導体層から成ることを特徴とする請求項 1 乃至 14 のいずれかに記載の半導体装置。

【請求項 17】 前記半導体領域は、メタル・セミコンダクタ電界効果トランジスタ (MESFET) を形成するための複数の半導体層から成ることを特徴とする請求項 1 乃至 14 のいずれかに記載の半導体装置。

【請求項 18】 窒化物系化合物半導体を有する半導体装置の製造方法であって、

シリコン又はシリコン化合物から成る基板を用意する工程と、

前記基板の上に、気相成長法によって、

化学式 $\text{Al}_x\text{M}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$

ここで、前記Mは、In（インジウム）とB（ボロン）とから選択された少なくとも1種の元素、

前記x及びyは、 $0 < x \leq 1$ 、

$0 \leq y < 1$ 、

$x + y \leq 1$

を満足する数値、

で示される材料から成る第1の層と、

化学式 $Al_aM_bGa_{1-a-b}N$ 、

ここで、前記MはIn（インジウム）とB（ボロン）とから選択された少なくとも1種の元素、

前記a及びbは、 $0 < a \leq 1$ 、

$0 \leq b < 1$ 、

$a + b \leq 1$

を満足させる数値、

で示される材料から成る第2の層と、

前記第1の層と前記第2の層との間に配置され且つ2次元ガスの発生を抑制することができる材料からなり且つ0.5～50nmの厚さを有している第3の層と

の複合層を含むバッファ層を形成する工程と、

前記バッファ層の上に、少なくとも1つの窒化物系化合物半導体層から成る半導体素子用半導体領域を気相成長法によって形成する工程と、

前記半導体素子用半導体領域の表面上に第1及び第2の主電極と制御電極とを形成する工程と

を有することを特徴とする半導体装置の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は窒化物系化合物半導体を用いたMESFETやHEMT等の半導体装置及びその製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

【特許文献1】 特開 2001-274376 号公報

【特許文献2】 特願 2001-248735 号公報

窒化ガリウム系化合物半導体を用いたメタル・セミコンダクタ電界効果トランジスタ即ちMESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) や高電子移動度トランジスタ即ちHEMT (High Electron Mobility Transistor) 等の半導体デバイスは公知である。

従来の典型的な窒化ガリウム系化合物半導体を用いた半導体デバイスにおいては、サファイアから成る絶縁性基板の上に、500～600℃程度の比較的低温の基板温度で形成したGaNまたはAlNから成る低温バッファ層（以下、単に低温バッファ層と言う。）を介して化合物半導体を形成する。

【0003】

即ち、MESFETを形成する場合には、サファイアから成る絶縁性基板の上にGaNまたはAlNから成る低温バッファ層を介してSiをドーブしたn形GaN層から成る動作層即ちチャネル層を形成し、動作層の表面にソース電極、ドレイン電極及びゲート電極を形成する。

また、HEMTを形成する場合には、サファイアから成る絶縁性基板の上にGaNまたはAlNから成る低温バッファ層を介して非ドーブのGaNから成る電子走行層即ちチャネル層とn形AlGaInから成る電子供給層を積層して形成し、電子供給層の表面にソース電極、ドレイン電極及びゲート電極を形成する。

【0004】

ところで、サファイアから成る絶縁性基板は硬度が高いため、このダイシング等を生産性良く行うことが困難であった。また、サファイアは高価であるため、半導体デバイスのコストが高くなった。

また、サファイア基板の熱伝導率は、0.126W/cm・Kと小さい為、デバイスの動作中に発生する熱を十分に放出することができず、デバイスの耐圧や利得などの諸特性の低下を招いた。

更に、GaN系HEMTでは、一般にGaN層の上にAlGaInを積層したヘテロ構造が採用さ

れているが、GaN層の上にAlGaInを成長させた場合、格子不整によりAlGaIn中の面内方向に引っ張り歪を発生させる。この応力のため、界面にはピエゾ分極電界が発生し、自発分極と併せるとヘテロ界面には数MV/cmという電界が発生する。この電界によりチャンネル中には 10^{13}cm^{-2} オーダーの2次元電子ガス即ち2DEGが蓄積し、チャンネルシート抵抗の低下が図られ、ドレイン電流を増加させることができる。このことはGaN層の上にAlGaInを積層したヘテロ構造を採用したGaN系HEMTの利点である。

【0005】

しかしながら、サファイア基板は窒化物系化合物半導体よりも熱膨張係数が大きい為、熱不整によってエピタキシャル層に圧縮歪を発生させる。この圧縮歪は、格子不整に起因したAlGaIn中の引っ張り歪をキャンセルする方向に働く為、ピエゾ分極電界を減少させてしまう。このため、2DEGの電子濃度も低下し、GaN層上にAlGaIn層を積層したヘテロ構造を有するGaN系HEMTの利点を十分に発揮することができない。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

上記のような問題点を解決するために、前記特許文献1及び前記特許文献2では、サファイア基板の代りにシリコン基板が使用されている。更に、本件出願人に係る前記特許文献2に、シリコン基板の上にバッファ層を介して良好な結晶性を有する窒化ガリウム系化合物半導体領域を形成するために、バッファ層を、化学式 $\text{Al}_x\text{M}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$

ここで、前記Mは、In（インジウム）とB（ボロン）とから選択された少なくとも1種の元素、

$$\text{前記 } x \text{ 及び } y \text{ は、 } 0 < x \leq 1、$$

$$0 \leq y < 1、$$

$$x + y \leq 1$$

を満足する数値、

で示される材料から成る第1の層と、

化学式 $\text{Al}_a\text{M}_b\text{Ga}_{1-a-b}\text{N}$

ここで、前記MはIn（インジウム）とB（ボロン）とから選択された少なくとも1種の元素、

前記a及びbは、 $0 \leq a \leq 1$ 、

$0 \leq b < 1$ 、

$a + b \leq 1$

を満足させる数値、

で示される材料から成る第2の層と

の積層体で構成することが提案されている。

前記特許文献2の技術に従って、第1及び第2の層の積層構造のバッファ層を介在させてシリコン基板上に窒化物系化合物半導体領域を形成すると、Al元素の混合比が相対的に高い第1の層の格子定数が、シリコンと窒化物系化合物半導体との間の値を有するため、バッファ層がシリコン基板の結晶方位を良好に引き継ぐことができる。このため、バッファ層の上面に窒化物系化合物半導体領域を結晶方位を揃えて良好に形成することができ、特性の良好な窒化ガリウム系化合物半導体デバイスが得られることが期待された。

しかしながら、第1の層としての例えばAlN又はAlGaN層と第2の層としての例えばGaN層とを交互に積層して形成したバッファ層は、AlN又はAlGaN層とGaN層とのヘテロ接合界面に2次元電子ガス層が形成されるため、比較的低抵抗な層となる。この結果、第1及び第2の層から成るバッファ層を用いたGaN系HEMTにおいては、本来のドレイン電流通路となるノンドープGaN層（電子走行層）とスペーサ層（ノンドープAlGaN層）との界面以外に、バッファ層を介した電流通路も形成され、デバイスの耐圧を低下させてしまう。このような耐圧低下を防止する手段として、バッファ層の上面に形成されるノンドープGaN層（電子走行層）の結晶欠陥を減少させることが考えられる。しかし、結晶欠陥を減少させる具体的な方策はない。また、ノンドープGaN層（電子走行層）を厚く形成することや、nライクになっているGaN層（電子走行層）にp型不純物をカウンタドープして高抵抗化させる方法が考えられるが、これらの方法を採用すると、窒化ガリウム系化合物半導体に働く歪によってクラックが発生し、デバイスの特性が劣化する。

【0007】

そこで、本発明の目的は、上述の問題点を解決できる窒化物系化合物半導体を用いたMESFETやHEMT等の半導体装置及びその製造方法を提供することにある。

【0008】

【課題を解決するための手段】

上記課題を解決し、上記目的を達成するための本発明は、窒化物系化合物半導体を有する半導体装置であって、

シリコン又はシリコン化合物から成る基板と、

前記基板の一方の主面上に配置されバッファ層と、

前記バッファ層の上に配置された少なくとも1つの窒化物系化合物半導体層を含んでいる半導体素子用半導体領域と、

前記半導体素子用半導体領域の表面上に配置された第1の主電極、第2の主電極及び制御電極とを備え、

前記バッファ層は、

化学式 $Al_xM_yGa_{1-x-y}N$

ここで、前記Mは、In（インジウム）とB（ボロン）とから選択された少なくとも1種の元素、

前記x及びyは、 $0 < x \leq 1$ 、

$0 \leq y < 1$ 、

$x + y \leq 1$

を満足する数値、

で示される材料から成る第1の層と、

化学式 $Al_aM_bGa_{1-a-b}N$

ここで、前記MはIn（インジウム）とB（ボロン）とから選択された少なくとも1種の元素、

前記a及びbは、 $0 \leq a \leq 1$ 、

$0 \leq b < 1$ 、

$a + b \leq 1$

を満足させる数値、

で示される材料から成る第2の層と、

前記第1の層と前記第2の層との間に配置され且つ2次元ガスの発生を抑制することができる材料からなり且つ0.5～50nmの厚さを有している第3の層と

の複合層とから成ることを特徴とする半導体装置に係るものである。

【0009】

なお、請求項2に示すように、前記第1の層を $Al_xGa_{1-x}N$ 、前記第2の層を、 $Al_aGa_{1-a}N$ とすることができる。

また、請求項3に示すように、前記第1の層を $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ とし、前記第2の層を、 $Al_aIn_bGa_{1-a-b}N$ とし、前記第1及び第2の層の少なくとも一方にIn（インジウム）を含めることができる。

また、請求項4に示すように、前記第1の層を、 $Al_xB_yGa_{1-x-y}N$ とし、前記第2の層を、 $Al_aB_bGa_{1-a-b}N$ とし、前記第1及び第2の層の少なくとも一方にB（ボロン）を含めることができる。

また、請求項5に示すように、前記第1の層の格子定数は、第2の層の格子定数よりも小さいことが望ましい。

また、請求項6に示すように、前記第2の層はAlを含まないか、またはAlの組成比が前記第1の層の組成比よりも小さいことが望ましい。

また、請求項7に示すように、前記第3の層の厚みは、前記第1の層の厚みよりも小さいことが望ましい。

また、請求項8に示すように、前記第3の層は、第2の層と同一の半導体材料から成り、導電型決定不純物としてp型不純物を含むことが望ましい。このような第3の層は、第1の層と第2の層との間に形成されるポテンシャル障壁を下げ、2次元ガスの発生を良好に抑制する。なお、第3の層を第1の層と同一半導体材料で形成すると、ポテンシャル障壁が高くなり、2次元ガス発生抑制効果が得られない。

また、請求項9に示すように、前記第3の層を、0.5～5nm、より好ましくは0.5～2nmの厚さの絶縁層とすることができる。

また、請求項10に示すように、前記絶縁層は、SiN、SiO₂、Al₂O₃、

Ti_2O_3 , ZrO_2 及び Ta_2O_5 から選択された少なくとも1つとすることができ、絶縁膜は第2の層の歪を緩和して、2次元ガスの発生を抑制する。

また、請求項11に示すように、前記バッファ層は、前記第1及び第2の層を複数有し、前記第3の層を少なくとも1つ有し、複数の前記第1及び第2の層が交互に積層され、複数の前記第1及び第2の層の相互間の内の少なくとも1つに前記第3の層が配置されていることが望ましい。

また、請求項12に示すように、前記バッファ層における前記第1の層の厚みが0.5 nm～50 nm及び前記第2の層の厚みが0.5 nm～200 nmであることが望ましい。

また、請求項13に示すように、前記基板の前記バッファ層が配置されている側の主面は、ミラー指数で示す結晶の面方位において(111)ジャスト面又は(111)面から-4度から+4度の範囲で傾いている面であることが望ましい。

また、請求項14に示すように、前記窒化物系化合物半導体層は、Ga₂N(窒化ガリウム)層、AlInN(窒化インジウム アルミニウム)層、AlGa₂N(窒化ガリウム アルミニウム)層、InGa₂N(窒化ガリウム インジウム)層、及びAlInGa₂N(窒化ガリウム インジウム アルミニウム)層から選択されたものであることが望ましい。

また、請求項15に示すように、前記半導体領域を、電界効果トランジスタを形成するための複数の半導体層とし、前記第1の主電極をソース電極とし、前記第2の主電極をドレイン電極とし、前記制御電極をゲート電極とすることができる。

また、請求項16に示すように、前記半導体領域を、高電子移動度トランジスタ(HEMT)を形成するための複数の半導体層とすることができる。

また、請求項17に示すように、前記半導体領域を、メタル・セミコンダクタ電界効果トランジスタ(MESFET)を形成するための複数の半導体層とすることができる。

また、請求項18に示すように、窒化物系化合物半導体を有する半導体装置の製造方法において、

シリコン又はシリコン化合物から成る基板を用意する工程と、
前記基板の上に、気相成長法によって、

化学式 $A l_x M_y G a_{1-x-y} N$

ここで、前記Mは、In（インジウム）とB（ボロン）とから選択された少なくとも1種の元素、

前記x及びyは、 $0 < x \leq 1$ 、

$0 \leq y < 1$ 、

$x + y \leq 1$

を満足する数値、

で示される材料から成る第1の層と、

化学式 $A l_a M_b G a_{1-a-b} N$ 、

ここで、前記MはIn（インジウム）とB（ボロン）とから選択された少なくとも1種の元素、

前記a及びbは、 $0 < a \leq 1$ 、

$0 \leq b < 1$ 、

$a + b \leq 1$

を満足させる数値、

で示される材料から成る第2の層と、

前記第1の層と前記第2の層との間に配置され且つ2次元ガスの発生を抑制することができる材料からなり且つ0.5～50nmの厚さを有している第3の層と

の複合層を含むバッファ層を形成する工程と、

前記バッファ層の上に、少なくとも1つの窒化物系化合物半導体層から成る半導体素子用半導体領域を気相成長法によって形成する工程と、

前記半導体素子用半導体領域の表面上に第1及び第2の主電極と制御電極とを形成する工程と

を有することが望ましい。

【0010】

【発明の効果】

各請求項の発明によれば次の効果が得られる。

(1) バッファ層の第1の層と第2の層との間に2次元電子ガスの発生を抑制する第3の層を配置したので、第1及び第2の層を直接に接触させた従来に比べて2次元電子ガスの発生量が少なく又は零になり、バッファ層の低抵抗化が防止される。この結果、バッファ層を介して流れる電流成分が低減又は零になり、高耐圧の半導体装置を得ることができる。

(2) 第3の層の厚みが0.5～50 nmの範囲に限定されているので、半導体素子用半導体領域に働く歪みによるクラック発生が低減し、良好な電気的特性が得られる。

(3) 格子定数がシリコンとGaNとの間の値を有する第1の層を含むバッファ層は、基板の結晶方位を良好に引き継ぐことができる。この結果、バッファ層の一方の主面に、窒化物系半導体領域を結晶方位を揃えて良好に形成することができる。このため、半導体領域の平坦性が良くなり、半導体装置の電気的特性も良くなる。もし、シリコンから成る基板の一方の主面に、GaN半導体のみによって低温でバッファ層を形成した場合、シリコンとGaNとは格子定数の差が大きいため、このバッファ層の上面に平坦性に優れた窒化物系半導体領域を形成することはできない。

請求項3の発明では、バッファ層を構成する第1の層と第2の層の内の少なくとも一方の層にインジウムが含まれている。第1及び第2の層の少なくとも一方をインジウムを含む窒化物系化合物半導体（窒化インジウム系化合物半導体）とすれば、基板と窒化物系半導体領域との間の応力緩和効果が更に良好に得られる。即ち、第1及び第2の層の少なくとも一方を構成する窒化インジウム系化合物半導体、例えばInN、InGaN、AlInN、AlInGaN等はInを構成元素として含まない他の窒化物系化合物半導体、例えば、GaN、AlN等と比較して、シリコン又はシリコン化合物から成る基板と熱膨張係数がより近似する。このため、バッファ層を構成する第1の層と第2の層のうち少なくとも一方の層にインジウムを含めることによって、基板と窒化物系半導体領域との間の熱膨張係数の差に起因する半導体領域の歪を良好に防止できる。

請求項4の発明においては、バッファ層を構成する第1の層と第2の層の内の少

なくとも一方の層にB（ボロン）が含まれている。B（ボロン）を含むバッファ層は、B（ボロン）がまないバッファ層よりもシリコン又はシリコン化合物から成る基板の熱膨張係数に近い熱膨張係数を有する。このため、B（ボロン）を含むバッファ層によれば、シリコン又はシリコン化合物から成る基板と窒化物系半導体領域との間の熱膨張係数差に起因する窒化物系半導体領域の歪を良好に防止できる。

請求項11の発明においては、複数の第1の層と複数の第2の層とを交互に積層してバッファ層を構成するので、複数の薄い第1の層が分散配置される。この結果、バッファ層全体として良好なバッファ機能を得ることができ、バッファ層の上に形成される半導体領域の結晶性が良くなる。

請求項12の発明によれば、バッファ層のバッファ機能が向上し、窒化物系半導体領域の平坦性を良くすることができる。

請求項13の発明によれば、基板の上にバッファ層及び半導体領域を良好に形成することができる。即ち、基板の主面の面方位を（111）ジャスト面又は（111）ジャスト面からのオフ角度が小さい面とすることによって、バッファ層及び半導体領域の結晶表面の原子ステップ即ち原子レベルでのステップを無くすこと又は少なくすることができる。もし、（111）ジャスト面からのオフ角度の大きい主面上にバッファ層及び半導体領域を形成すると、これ等に原子レベルで見ると比較的大きいステップが生じる。エピタキシャル成長層が比較的厚い場合には多少のステップはさほど問題にならないが、厚みの薄い層を有する半導体装置の場合には、特性の低下を招く恐れがある。これに対して、基板の主面を（111）ジャスト面又はオフ角度の小さい面とすれば、ステップが小さくなり、バッファ層及び半導体領域が良好に形成される。

請求項18の発明によれば、特性の良い半導体装置を安価且つ容易に形成することができる。

【0011】

【第1の実施形態】

次に、図1～図3を参照して本発明の第1の実施形態に係る窒化ガリウム系化合物半導体を用いたHEMTを説明する。

【0012】

図1に示す本発明の第1の実施形態に係るHEMTは、シリコンから成るサブストレート即ち基板1とバッファ層2とHEMT素子用半導体領域3と第1の電極としてのソース電極4と第2の電極としてのドレイン電極5と制御電極としてのゲート電極6と絶縁膜7とから成る。

【0013】

基板1は、導電形決定不純物としてB（ボロン）等の3族元素を含むp形シリコン単結晶から成る。この基板1のバッファ層2が配置されている側の主面1aは、ミラー指数で示す結晶の面方位において（111）ジャスト面である。この基板1の不純物濃度は、基板1を通るリーク電流を低減させるために比較的低い値、例えば $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \sim 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 程度であり、この基板1の抵抗率は比較的高い値、例えば $100 \Omega \cdot \text{cm} \sim 1000 \Omega \cdot \text{cm}$ 程度である。基板1は、比較的厚い約 $500 \mu\text{m}$ の厚みを有し、半導体領域3及びバッファ層2の支持体として機能する。

【0014】

基板1の一方の主面全体を被覆するように配置されたバッファ層2は、複数の第1の層8と複数の第2の層9とこれらの相互間の第3の層10とが積層された複合層から成る。図1では、図示の都合上、バッファ層2の一部のみが示されているが、実際には、バッファ層2は、20個の第1の層8と20個の第2の層9と39個の第3の層10を有する。

【0015】

第1の層8は、

化学式 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

ここで、 x は $0 < x \leq 1$ を満足する任意の数値、

で示すことができる材料で形成される。即ち、第1の層8は、導電型決定不純物がドーピングされていないAlN（窒化アルミニウム）又はAlGa_xN（窒化ガリウム

アルミニウム）で形成される。図1及び図2の実施形態では、前記式の x が1とされた材料に相当するAlN（窒化アルミニウム）が第1の層8に使用されている。第1の層8の格子定数及び熱膨張係数は第2の層9よりもシリコン基板1

に近い。なお、第1の層8の格子定数が第2の層9の格子定数よりも小さいことが望ましい。

【0016】

バッファ層2の第1の層8の好ましい厚みは、0.5nm～50nm即ち5～500オングストロームである。第1の層8の厚みが0.5nm未満の場合にはバッファ層2の上面に形成される素子用半導体領域3の平坦性が良好に保てなくなる。第1の層8の厚みが5.0nmを超えると、第1の層8と第2の層9との格子不整差、及び第1の層8と基板1との熱膨張係数差に起因して第1の層8内に発生する引っ張り歪みにより、第1の層8内にクラックが発生する恐れがある。

【0017】

第2の層9は、導電型決定不純物がドーピングされていないGaN（窒化ガリウム）又は

化学式 $Al_yGa_{1-y}N$

ここで、 y は、 $y < x$ 、

$0 < y < 1$

を満足する任意の数値、

で示すことができる材料から成る極く薄い膜である。第2の層9として $Al_yGa_{1-y}N$ から成る導電型決定不純物を含まない半導体を使用する場合には、Al（アルミニウム）の増大により発生する恐れのあるクラックを防ぐために y を $0 < y < 0.8$ を満足する値即ち0よりも大きく且つ0.8よりも小さくすることが望ましい。また、第2の層9のAlの組成比は、第1の層8のAlの組成比よりも小さいことが望ましい。なお、この第1の実施形態の第2の層9は、上記化学式における $y = 0$ に相当するGaNから成る。

前記第2の層9を、化学式 $Al_yGa_{1-y}N$

ここで、 y は $y < x$ 及び $0 \leq y < 1$ を満足する数値、

で表すこともできる。

【0018】

第2の層9の好ましい厚みは、0.5nm～200nm即ち5～2000オングストロームである。第2の層9の厚みが0.5nm未満の場合には、第1の層

8、及びバッファ層 2 上に成長される素子用半導体領域 3 を平坦に成長させることが困難になる。また、第 2 の層 9 の厚みが 200 nm を超えると、第 2 の層 9 と第 1 の層 8 との組合せによる応力緩和効果が損なわれ、クラックが発生するおそれがある。

更に好ましくは、第 2 の層 9 の厚みを第 1 の層 8 の厚みより大きくするのがよい。このようにすれば、第 1 の層 8 と第 2 の層 9 との格子不整差及び第 1 の層 8 と基板 1 との熱膨張係数差に起因して第 1 の層 8 に発生する歪の大きさを第 1 の層 9 にクラックが発生しない程度に抑えること、及び電子走行層 11 の電子濃度を高濃度に保つことにおいて有利になる。

【0019】

第 3 の層 10 は、2 次元電子ガスの発生を抑制するための層であって、複数の第 1 及び第 2 の層 8、9 の相互間のそれぞれに配置されている。この第 1 の実施形態の第 3 の層 10 は、p 型不純物として Mg を含む GaN から成り、且つ好ましい範囲の 0.5 ~ 50 nm から選択された 1 ~ 5 nm の厚さを有する。もし、第 3 の層 10 が設けられていない時には、第 1 の層 8 と第 2 の層 9 とのヘテロ接合界面に 2 次元電子ガス層が形成され、バッファ層 2 の抵抗が低下する。これに対して、p 型不純物を含む GaN から成る第 3 の層 10 を第 1 及び第 2 の層 8、9 間に配置すると、この間に形成されているポテンシャル障壁が下がり、2 次元電子濃度が低下してバッファ層 2 の抵抗が高くなる。この第 3 の層 10 の厚みは、第 1 の層 8 の厚みよりも小さいことが望ましい。

なお、第 3 の層 10 を複数の第 1 及び第 2 の層 8、9 の相互間の全てに配置しないで、複数の第 1 及び第 2 の層 8、9 の相互間の内の一部又は 1 つのみに配置することができる。

【0020】

HEMT 素子半導体領域 3 は、不純物非ドーパの GaN から成る電子走行層 11 と、非ドーパの $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ から成るスペーサ層 12 と、n 形不純物として Si のドーパされている n 形 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ から成る電子供給層 13 とを有している。素子用半導体領域 3 の各層 11、12、13 は窒素とガリウムをベースとした窒化ガリウム系化合物半導体から成る。バッファ層 2 の上に配置された電子走行層 11 はチャネ

ル層とも呼ぶことができるものであり、例えば、500 nmの厚みを有する。電子走行層 11 の上に配置されたスペーサ層 12 は例えば 7 nmの厚みを有し、電子供給層 13 の n 形不純物としてのシリコンが電子走行層 11 に拡散することを抑制する。なお、このスペーサ層 12 を省いた構成にすることもできる。スペーサ層 12 の上に配置された電子供給層 13 はドナー不純物（n 型不純物）から発生した電子を電子走行層 11 に供給するものであって、例えば 30 nmの厚みを有する。ソース電極 4 及びドレイン電極 5 は電子供給層 13 にオーミック接触し、ゲート電極 6 は電子供給層 13 にショットキー接触している。なお、ソース電極 4 及びドレイン電極 5 と電子供給層 13 との間に n 形不純物濃度の高いコンタクト層を設けることができる。SiO₂から成る絶縁膜 7 は半導体領域 3 の表面を覆っている。

【0021】

電子供給層 13 及びスペーサ層 12 は極く薄い膜であるので、横方向には絶縁物として機能し、縦方向には導電体として機能する。従って、HEMTの動作時には、ソース電極 4、電子供給層 13、スペーサ層 12、電子走行層 11、スペーサ層 12、電子供給層 13、ドレイン電極 5 の経路で電子が流れる。この電子の流れ即ち電流の流れはゲート電極 6 に印加される制御電圧で調整される。

【0022】

次に、バッファ層 2 における第 1 の層 8 が AlN、第 2 の層 9 が GaN、第 3 の層 10 が p 型不純物を含む GaN とされた HEMT の製造方法を説明する。まず、図 3 の (A) に示す p 形不純物が導入された p 型シリコン半導体から成る基板 1 を用意する。バッファ層 2 を形成する側のシリコン基板 1 の一方の主面 1a は、ミラー指数で示す結晶の面方位において (111) ジャスト面、即ち正確な (111) 面である。しかし、図 3 において 0 で示す (111) ジャスト面に対して $-\theta \sim +\theta$ で示す範囲で基板 1 の主面 1a を傾斜させることができる。 $-\theta \sim +\theta$ の範囲は $-4^\circ \sim +4^\circ$ であり、好ましくは $-3^\circ \sim +3^\circ$ であり、より好ましくは $-2^\circ \sim +2^\circ$ である。

シリコン基板 1 の主面 1a の結晶方位を、(111) ジャスト面又は (111) ジャスト面からのオフ角度が小さい面とすることによって、バッファ層 2 及び素

子用半導体領域3をエピタキシャル成長させる際の原子レベルでのステップを無くすこと又は小さくすることができる。

【0023】

次に、図3 (B) に示すように基板1の主面1a上に、エピタキシャル成長法の一つである周知のMOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 即ち有機金属化学気相成長法によってAlNから成る第1の層8とp型GaNから成る第3の層10とGaNから成る第2の層9とを繰返して積層することによってバッファ層2を形成する。即ち、HF系エッチャントで前処理したp形シリコン単結晶基板1をMOCVD装置の反応室内に配置し、まず、1100℃で約10分間のサーマルアニーリングを施して表面の酸化膜を除去する。次に、反応室内にTMA (トリメチルアルミニウム) ガスとNH₃ (アンモニア) ガスを約30秒間供給して、基板1の一方の主面に厚さ約5nmのAlN層から成る第1の層8を形成する。本実施例では基板1の加熱温度を1100℃とした後に、TMAガスの流量即ちAlの供給量を約18 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、NH₃ ガスの流量即ちNH₃ の供給量を約0.11 mol/min とした。

次に、TMAガスの供給を止めてから、TMG (トリメチルガリウム) ガスとNH₃ (アンモニア) ガスとビスシクロペンタジエニルマグネシウムガス即ちCp₂Mgガスを供給してp型不純物としてMgを含むGaNから成る第3の層10を厚さ3~6nmの範囲に形成する。p型不純物はMgに限定されるものでなく、Mg以外の2族の元素、例えばZn, Sr, Ca, Be, Ba, Cd, Ra等から選択することができる。

次に、Cp₂Mgガスの供給を停止して、反応室内にTMG (トリメチルガリウム) ガスとNH₃ (アンモニア) ガスとを約30秒間供給して、第3の層10の上面に、厚さ約20nmのn形のGaNから成る第2の層9を形成する。本実施形態では、TMGガスの流量即ちGaの供給量を約70 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、NH₃ ガスの流量即ちNH₃ の供給量を約0.11 mol/min とした。

次に、Cp₂Mgガスを供給して再び第3の層10を形成する。

次に、第3の層10の上に再び第1の層8を形成する。

本実施形態では、AlNから成る第1の層8とGaNから成る第2の層9とのそ

れぞれを20回繰り返して形成し、p型GaNから成る第3の層を39回繰り返して形成した。勿論、第1、第2及び第3の層8、9、10をそれぞれ任意の数に変えることもできる。

【0024】

次に、バッファ層2の上面に周知のMOCVD法によってHEMT素子用形半導体領域3を形成する。

即ち、上面にバッファ層2が形成された基板1をMOCVD装置の反応室内に配置して、反応室内にまずトリメチルガリウムガス即ちTMGガス及びNH₃（アンモニア）ガスを10分間供給してバッファ層2の上面に約500nmの厚みの非ドープGaN即ち導電形決定不純物を含まないGaNから成る電子走行層11を形成する。本実施形態ではTMGガスの流量即ちGaの供給量を約70 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、NH₃ガスの流量即ちNH₃の供給量を約0.11 mol/min とした。

【0025】

次に、反応室内TMAガスとTMGガスとアンモニアガスを32秒間供給して電子走行層10の上面に非ドープ即ち導電形決定不純物を含まないAl_{0.2}Ga_{0.8}Nから成るスペーサ層12を7nmの厚みに形成する。本実施形態では、TMAガスの流量即ちAlの供給量を約5.8 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、TMGガスの流量を約17 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、NH₃ガスの流量を約0.11 mol/min とした。

【0026】

次に、約15秒間結晶成長を中断した後、反応室内にTMAガスとTMGガスとアンモニアガスとSiH₄（シラン）ガスを約138秒間供給してスペーサ層12の上面にAl_{0.2}Ga_{0.8}Nから成る電子供給層13を約30nmの厚みに形成する。本実施例では、この時のTMAガスの流量を約5.8 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、TMGガスの流量を約17 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、アンモニアガスの流量を約0.11 mol/min 、SiH₄ガスの流量を約21 nmol/min とした。

【0027】

その後、半導体領域3及びバッファ層2の形成されたシリコン基板1をMOCVD装置から取り出し、周知のプラズマCVDによって半導体領域3の全面にシ

リコン酸化膜から成る絶縁膜 7 を形成する。絶縁膜 7 の厚みは、約 250 nm とする。

【0028】

図 1 には 1 個の HEMT が示されているが、この製造時には 1 枚の半導体ウエハ即ち基板 1 を使用して多数の HEMT を同時に作る。このため、フォトリソグラフィにより、塩素 (Cl_2) と塩素系混合ガスを用いた反応性イオンエッチングにより、半導体領域 3 及びバッファ層 2 の素子分離領域をシリコン基板 1 までエッチングし、HEMT の素子分離を行う。このように素子分離すると、各素子領域の電気的特性等を他の素子の影響を受けることなしに良好に検査することができる。

【0029】

次に、フォトリソグラフィとフッ酸系エッチャントを使用して、絶縁膜 7 にソース電極及びドレイン電極形成用の開口を形成した後、電子ビーム蒸着等を用いて Ti (チタン) と Al (アルミニウム) を順次積層形成し、リフトオフしてソース電極 4、ドレイン電極 5 を形成する。ゲート電極を形成する時も、同様な手順で絶縁膜 7 に開口を形成し、電子ビーム蒸着によって Pd (パラジウム), Ti (チタン), Au (金) を蒸着し、リフトオフしてショットキバリア電極としての機能を有するゲート電極 6 を形成する。

その後、周知のダイシング工程等により、エピタキシャルウエハを素子分離領域で切断分離して個別化した半導体装置 (HEMT チップ) を完成させる。

【0030】

本実施形態の HEMT によれば、次の効果が得られる。

(1) バッファ層 2 の第 1 の層 8 と第 2 の層 9 との間に 2 次元電子ガスの発生を抑制する第 3 の層 10 を配置したので、第 1 及び第 2 の層 8, 9 を直接に接触させた従来に比べて 2 次元電子ガスの発生量が少なくなり、バッファ層 2 の低抵抗化が防止される。この結果、バッファ層 2 を介して流れる電流成分が低減又は零になり、高耐圧の HEMT を得ることができる。

(2) 第 3 の層 10 の厚みが 0.5 ~ 50 nm の範囲に限定されているので、半導体素子用半導体領域 3 に働く歪みによるクラック発生が低減し、良好な電

气的特性が得られる。

(3) 格子定数がシリコンとGaNとの間の値を有するAlNから成る第1の層8を含むバッファ層2は、シリコン基板1の結晶方位を良好に引き継ぐことができる。この結果、バッファ層2の一方の主面に、GaN系半導体領域3を結晶方位を揃えて良好に形成することができる。このため、半導体領域3の平坦性が良くなり、HEMTの電気的特性も良くなる。もし、シリコンから成る基板1の一方の主面に、GaN半導体のみによって低温でバッファ層を形成した場合、シリコンとGaNとは格子定数の差が大きいため、このバッファ層の上面に平坦性に優れたGaN系半導体領域を形成することはできない。

(4) AlNから成る第1の層8とGaNから成る第2の層9とを含むバッファ層2は、従来のGaNやAlNの単一層から構成される低温バッファ層に比較して高温で結晶成長させることができる。このため、窒素源となるアンモニアを良好に分解させることができ、バッファ層2はアモルファス層とならない。このため、バッファ層2の上に形成されるエピタキシャル成長層即ち半導体領域3の結晶欠陥の密度を十分に小さくすることができ、リーク電流の発生を防止することができる。この結果、ピンチオフ特性の良好なHEMTを提供することができる。

【0031】

【第2の実施形態】

次に、図4を参照して第2の実施形態のMESFETを説明する。但し、図4において、図1と実質的に同一の部分には同一の符号を付してその説明を省略する。

図4のMESFETは、図1のHEMTの半導体領域3を、n形不純物としてSiがドーピングされたGaN化合物半導体層から成るn形半導体領域3aを設け、この他は図1と同一に形成したものである。即ち、図4のMESFETにおいて、シリコン基板1、バッファ層2、ソース電極4、ドレイン電極5、ゲート電極6、絶縁膜7は図1で同一符号で示すものと同様に形成されている。n形半導体領域3aはチャネル層又は活性層とも呼ぶことができるものであり、バッファ層2の上に配置されている。ソース電極4及びドレイン電極5はn形半導体領域3

aにオーミック接触し、ゲート電極6はn形半導体領域3aにショットキバリア接触している。

【0032】

図4のMESFETのGaN半導体領域3a以外の製造方法は、第1の実施形態と同一である。GaN半導体領域3aを形成する時には、バッファ層2の形成時に使用した反応室内にTMGガスとNH₃ガスとSiH₄（シラン）ガスを約5分間供給して、基板1の一方の主面に形成されたバッファ層2の上面に、厚さ約250nmのn形半導体領域3aを形成する。本実施形態では、TMGガスの流量、即ちGaの供給量を約70 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 、NH₃ガスの流量即ちNH₃の供給量を0.11 mol/min 、SiH₄ガスの流量、即ちSiの供給量を21 nmol/min とした。

【0033】

図4のMESFETは、図1のHEMTの効果の説明の欄で述べた（1）（2）（3）と同様な効果を有する。即ち、バッファ層2の低抵抗化を防ぐこと、半導体領域3aの平坦性及び結晶性を良くすること、MESFETの特性を良くすることが可能になる。

【0034】

【第3の実施形態】

第1及び第2の実施形態のバッファ層2の構成を変えることができる。図5は、HEMT及びMESFET等を使用可能な第3の実施形態に従うバッファ層2aの一部を示す。この図5のバッファ層2aは、複数の第1の層8aと複数の第2の層9aとを、第1の実施形態と同一の2次元電子ガス抑制用のp型GaNから成る第3の層10を介して交互に積層したものから成る。

第1の層8aは、導電型決定不純物がドーピングされていない

化学式 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$

ここで、 x 、 y は、 $0 < x \leq 1$ 、

$0 \leq y < 1$ 、

$x + y \leq 1$

を満足する任意の数値、

で示すことができる材料で形成される。即ち、第1の層8aは、AlN（窒化アルミニウム）、AlGa_aN（窒化ガリウム アルミニウム）、AlIn_bN（窒化インジウム アルミニウム）、及びAlGaIn_cN（窒化ガリウム インジウム アルミニウム）から選択されたもので形成される。図5の実施形態では、前記式のxが0.5、yが0.01とされた材料に相当するAl_{0.5}In_{0.01}Ga_{0.49}Nが第1の層8aに使用されている。アルミニウムを含む第1の層8aの格子定数及び熱膨張係数はシリコン基板1の格子定数及び熱膨張係数と半導体領域3aの格子定数及び熱膨張係数との間の値を有する。

【0035】

第2の層9aは導電型決定不純物がドーピングされていない

化学式 $Al_aIn_bGa_{1-a-b}N$

ここで、a、bは、 $0 \leq a < 1$ 、

$0 \leq b < 1$ 、

$a + b \leq 1$

を満足する任意の数値、

で示すことができる材料から成る半導体の薄い膜である。即ち、第2の層9aは例えばGa_aN、AlN、In_bN、InGa_bN、AlGa_aN、AlIn_bN及びAlInGa_aNから選択されたもので形成される。図5の実施形態では、前記式のaが0.05、bが0.35とされた材料に相当するAl_{0.05}In_{0.35}Ga_{0.6}Nが第2の層9aに使用されている。第2の層9aの価電子帯と伝導帯との間のギャップ即ちバンドギャップが第1の層8aのバンドギャップよりも大きい。

【0036】

次に、第1の層8aがAl_{0.5}In_{0.01}Ga_{0.49}N、第2の層9aがAl_{0.05}In_{0.35}Ga_{0.6}N、第3の層10がp型Ga_aNとされたバッファ層2aの製造方法を説明する。

バッファ層2aは第1の実施形態と同様な基板1の主面1a上に形成される。このバッファ層2aは、周知のMOCVD即ち有機金属化学気相成長法によってAl_{0.5}In_{0.01}Ga_{0.49}Nから成る第1の層8aとp型Ga_aNから成る第3の層10とAl_{0.05}In_{0.35}Ga_{0.6}Nから成る第2の層9aとを繰返して積層するこ

とによって形成する。即ち、シリコン単結晶基板 1 を MOCVD 装置の反応室内に配置し、まず、サーマルアニーリングを施して表面の酸化膜を除去する。次に、反応室内に TMA (トリメチルアルミニウム) ガス、TMG (トリメチルガリウム) ガス、TMIn (トリメチルインジウム) ガスと NH₃ (アンモニア) ガスを約 24 秒間供給して、基板 1 の一方の主面に厚さ T1 が約 5 nm 即ち約 50 オングストロームの Al_{0.5}In_{0.01}Ga_{0.49}N から成る第 1 の層 8a を形成する。本実施形態では基板 1 の加熱温度を 800℃ とした後に、TMA ガスの流量即ち Al の供給量を約 12 μmol/min、TMG ガスの流量を 12 μmol/min、TMIn ガスの流量を 47 μmol/min、NH₃ ガスの流量即ち NH₃ の供給量を約 0.23 mol/min とした。

次に、第 1 の実施形態と同一の 2 次元電子ガス抑制用の p 型 GaN から成る第 3 の層 10 を形成する。

次に、基板 1 の加熱温度を 750℃ まで下げ、しかる後、TMA ガス、TMG ガス、TMIn ガス、及び NH₃ (アンモニア) ガスを約 83 秒間供給して、第 3 の層 10 の上面に、厚さ T2 が 30 nm 即ち 300 オングストロームの Al_{0.05}In_{0.35}Ga_{0.6}N から成る第 2 の層 9a を形成する。なお、SiH₄ ガスを同時に供給して形成膜中に不純物としての Si を導入することもできる。本実施形態では、TMA ガスの流量を 2.8 μmol/min、TMG ガスの流量を 12 μmol/min、TMIn ガスの流量を 59 μmol/min、NH₃ ガスの流量即ち NH₃ の供給量を約 0.23 mol/min とした。

次に、第 2 の層 9a の上に再び第 3 の層 10 を形成する。

本実施形態では、第 1 及び第 2 の層 8a, 9a をそれぞれ 20 層、第 3 の層 10 を 39 層とした。勿論、第 1、第 2 及び第 3 の層 8a, 10, 9a の数をそれぞれ任意に変えることもできる。また、第 3 の層 10 を第 1 及び第 2 の層 8a, 9a の相互間の全てに配置しないで一部の相互間のみに配置しても良い。

【0037】

図 5 の第 3 の実施形態のバッファ層 2a は図 1 の第 1 の実施形態と同一の効果を有し、更に、バッファ層 2a にインジウムが含まれているので、バッファ層 2a にインジウムを含めない場合よりもバッファ層 2a の熱膨張係数をシリコン基

板 1 に近似させることができるという効果を有する。

【0038】

【第 4 の実施形態】

図 6 に示す第 4 の実施形態のバッファ層 2 b は、図 1 及び図 4 のバッファ層 2 を変形したものであり、第 1 の実施形態と同一の 2 次元電子ガス抑制用の p 型 GaN から成る第 3 の層 10 を介した第 1 及び第 2 の層 8 b、9 b の交互積層体から成る。

第 1 の層 8 b は、導電型決定不純物がドーピングされていない

化学式 $Al_xB_yGa_{1-x-y}N$

ここで、 x 、 y は、 $0 < x \leq 1$ 、

$0 \leq y < 1$ 、

$x + y \leq 1$

を満足する任意の数値、

で示すことができる材料で形成される。即ち、第 1 の層 8 b は、AlN（窒化アルミニウム）、AlGa_{0.5}N（窒化ガリウム アルミニウム）、AlBN（窒化ボロン アルミニウム）、及び AlBGa_{0.5}N（窒化ガリウム ボロン アルミニウム）から選択されたもので形成される。図 6 の実施形態では、前記式の x が 0.5、 y が 0 とされた材料に相当する Al_{0.5}Ga_{0.5}N が第 1 の層 8 b に使用されている。第 1 の層 8 b の格子定数及び熱膨張係数は第 2 の層 9 b よりもシリコン基板 1 に近い。

【0039】

第 2 の層 9 b は、導電型決定不純物がドーピングされていない

化学式 $Al_aB_bGa_{1-a-b}N$

ここで、 a 、 b は、 $0 \leq a < 1$ 、

$0 \leq b < 1$ 、

$a + b \leq 1$

を満足する任意の数値、

で示すことができる材料から成る半導体の薄い膜である。即ち、第 2 の層 9 b は Al、B 及び Ga から選択された少なくとも 1 つの元素と N とを含む層であり、

例えば GaN、BN、AlN、BGaN、AlGaN、AlBN 及び AlBaN から選択されたもので形成される。図 6 の実施形態では、前記式の a が 0、b が 0.3 とされた材料に相当する $B_{0.3}Ga_{0.7}N$ が第 2 の層 9b に使用されている。第 2 の層 9b の価電子帯と伝導帯との間のギャップ即ちバンドギャップが第 1 の層 8b のバンドギャップよりも大きい。

【0040】

基板 1 の (111) ジャスト面を有する主面 1a 上に周知の MOCVD 即ち有機金属化学気相成長法によって $Al_{0.5}Ga_{0.5}N$ から成る第 1 の層 8b と $B_{0.3}Ga_{0.7}N$ から成る第 2 の層 9b とを第 3 の層 10 を介して繰返して積層することによってバッファ層 2b を形成する。即ち、シリコン単結晶の基板 1 を MOCVD 装置の反応室内に配置し、まず、サーマルアニーリングを施して表面の酸化膜を除去する。次に、反応室内に TMA (トリメチルアルミニウム) ガス、TMG (トリメチルガリウム) ガス、 NH_3 (アンモニア) ガスを約 27 秒間供給して、基板 1 の一方の主面に厚さ T1 が約 5 nm 即ち約 50 オングストロームの $Al_{0.5}Ga_{0.5}N$ から成る第 1 の層 8b を形成する。本実施例では基板 1 の加熱温度を $1080^{\circ}C$ とした後に、TMA ガスの流量即ち Al の供給量を $12 \mu mol/min$ 、TMG ガスの流量を $12 \mu mol/min$ 、 NH_3 ガスの流量即ち NH_3 の供給量を $0.11 mol/min$ とした。

次に、第 1 の実施形態と同一の方法で、2 次元電子ガス抑制用の p 型 GaN から成る第 3 の層 10 を形成する。

次に、TEB (トリエチルボロン) ガス、TMG ガス、及び NH_3 (アンモニア) ガスを約 85 秒間供給して、第 3 の層 10 の上面に、厚さ T2 が 30 nm 即ち 300 オングストロームの n 形の $B_{0.3}Ga_{0.7}N$ から成る第 2 の層 9b を形成する。なお、同時に SiH_4 ガスを供給して形成膜中に不純物としての Si を導入することもできる。本実施例では、TEB ガスの流量即ちボロンの供給量を $7 \mu mol/min$ 、TMG ガスの流量即ちガリウムの供給量を $16 \mu mol/min$ 、 NH_3 ガスの流量即ち NH_3 の供給量を $0.11 mol/min$ とした。

次に、第 2 の層 9b の上に再び第 3 の層 10 を形成する。

本実施形態では、第 1 の層 8b と第 2 の層 9b とを 50 層、第 3 の層 10 を 99

層とした。勿論、第1の層8bと第2の層9bと第3の層10とのそれぞれの数を任意に変えることもできる。

【0041】

図6のバッファ層2bは図1のバッファ層2と同様な効果を有し、更に、第2の層9bにボロンが含まれているので、第2の層9bがボロンを含まない場合に比べて堅牢になり、クラックの発生を防いで第2の層9bを比較的厚く形成することができるという効果を有する。

【0042】

【第5の実施形態】

図7は第5の実施形態に従うバッファ層2cを示す。図7のバッファ層2cは、図1のp型GaNから成る第3の層10の代りに絶縁層から成る第3の層10aを設け、この他は第1の実施形態と同一に構成したものである。もし、第3の層10aを設けないと、例えばAlN又はAlGaNから成る第1の層8と例えばGaNから成る第2の層9とのヘテロ接合に基づくピエゾ電界によって第1の層8に歪が発生し、2次元電子ガスが発生する。これに対し、本実施形態に従って、絶縁層から成る第3の層10aを第1及び第2の層8、9間に介在させると、第1の層8の歪発生を防止することができ、2次元電子ガスが抑制される。第1の層8の歪みを防止するための第3の層10aの絶縁材料としてSiN, SiO₂, Al₂O₃, Ti₂O₃, ZrO₂, Ta₂O₅等を使用することができる。バッファ層2c及び半導体領域3の結晶性の劣化を抑えるために絶縁層から成る第3の層10aの厚みを好ましくは0.5～5nm、より好ましくは0.5～2nmとする。なお、図4、図5及び図6の第2、第3及び第4の実施形態の第3の層10の代りに、図7と同様に絶縁層から成る第3の層10aを設けることができる。

この第5の実施形態によっても第1～第4の実施形態と同様な効果が得られる。

【0043】

【変形例】

本発明は上述の実施形態に限定されるものでなく、例えば次の変形が可能なも

のである。

(1) 基板 1 を単結晶シリコン以外の多結晶シリコン又は SiC 等のシリコン化合物とすることができる。

(2) 半導体領域 3、3a の各層の導電型を各実施形態と逆にすることができる。

(3) 半導体領域 3、3a の各層を、GaN (窒化ガリウム)、AlInN (窒化インジウム アルミニウム)、AlGaInN (窒化ガリウム アルミニウム インジウム)、及び AlInGaN (窒化ガリウム インジウム アルミニウム) から選択された窒化ガリウム系化合物半導体又は窒化インジウム系化合物半導体とすることができる。

(4) 図 1 の HEMT において、活性層即ち電子走行層 11 とバッファ層 2 との間に電子供給層 13 と同様な電子供給層を設けることができる。

(5) 本発明に従って HEMT 及び MESFET の代りに絶縁ゲート型電量効果トランジスタを設けることができる。

(6) バッファ層 2、2a、2b の第 1 の層 8、8a、8b の数を第 2 の層 9、9a、9b よりも 1 層多くしてバッファ層 2、2a、2b の最上層を第 1 の層 8、8a、8b とすることができる。また、逆に第 2 の層 9、9a、9b の数を第 1 の層 8、8a、8b の数よりも 1 層多くすることもできる。

(7) 第 1 の層 8、8a、8b 及び第 2 の層 9、9a、9b は、これらの機能を阻害しない範囲で不純物を含むものであってもよい。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明の第 1 の実施形態に従うの HEMT を概略的に示す中央縦断面図である。

【図 2】

図 1 の HEMT の平面図である。

【図 3】

図 1 の HEMT の構造を製造工程順に拡大して示す断面図である。

【図 4】

第 2 の実施形態の MESFET を示す断面図である。

【図 5】

第 3 の実施形態の基板とバッファ層の一部を示す断面図である。

【図 6】

第 4 の実施形態の基板とバッファ層の一部を示す断面図である。

【図 7】

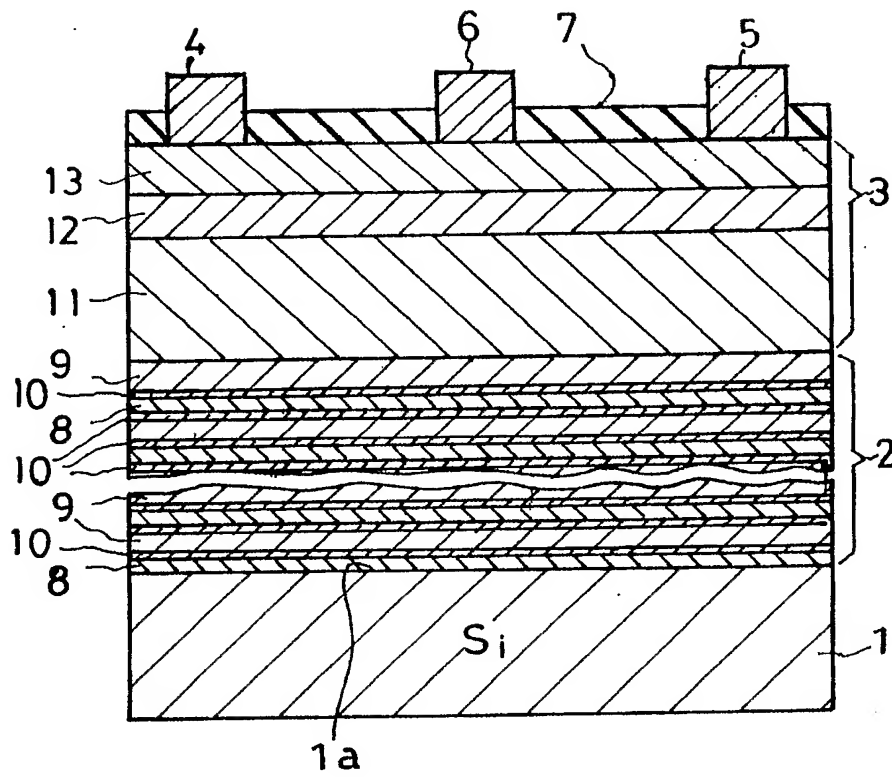
第 5 の実施形態の基板とバッファ層の一部を示す断面図である。

【符号の説明】

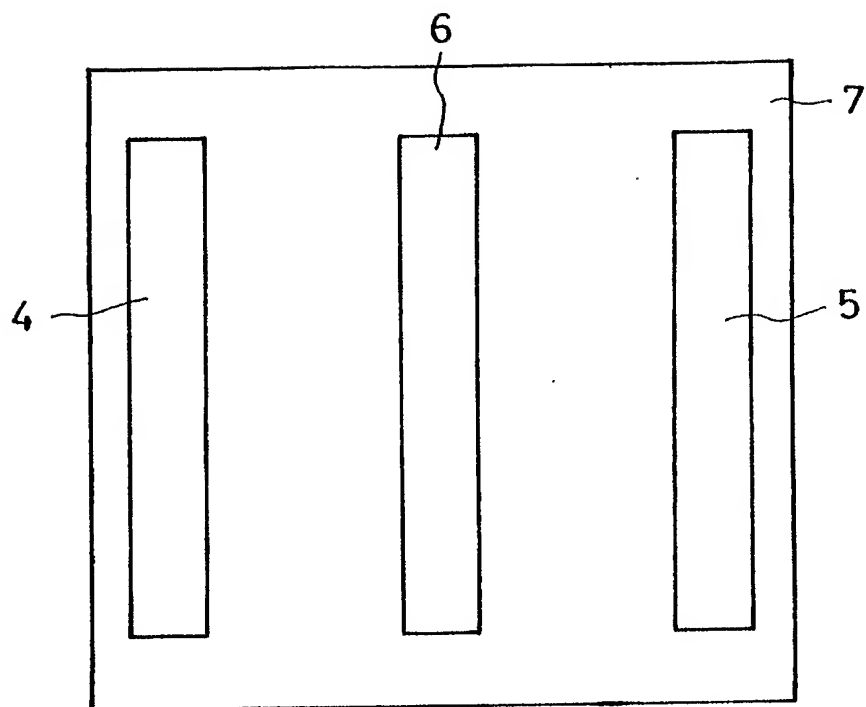
- 1 シリコン単結晶から成る基板
- 2、2 a、2 b バッファ層
- 3、3 a 半導体領域
- 8、8 a、8 b 第 1 の層
- 9、9 a、9 b 第 2 の層
- 1 0、1 0 a 第 3 の層

【書類名】 図面

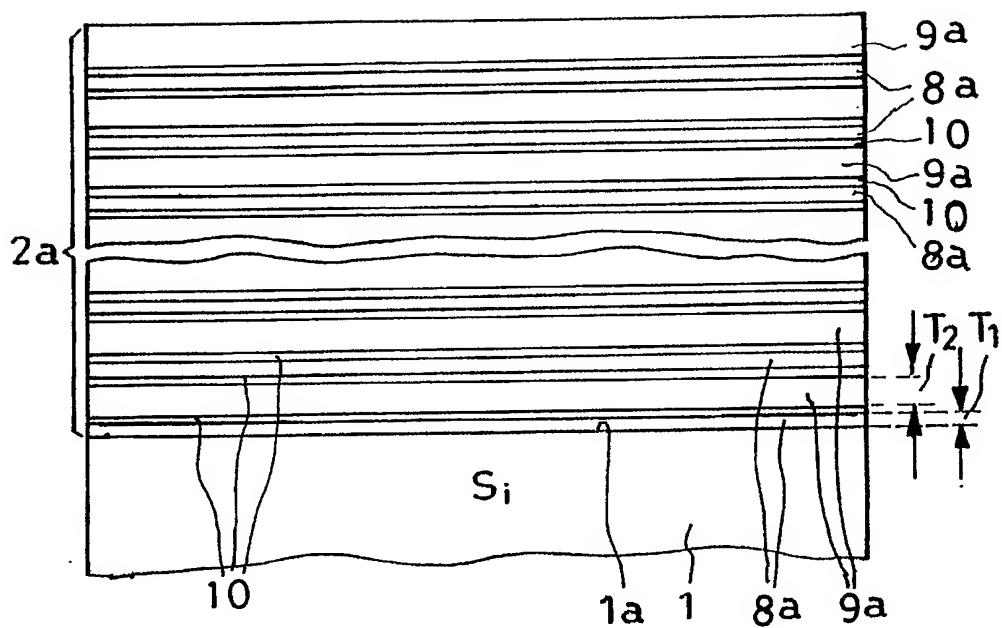
【図 1】



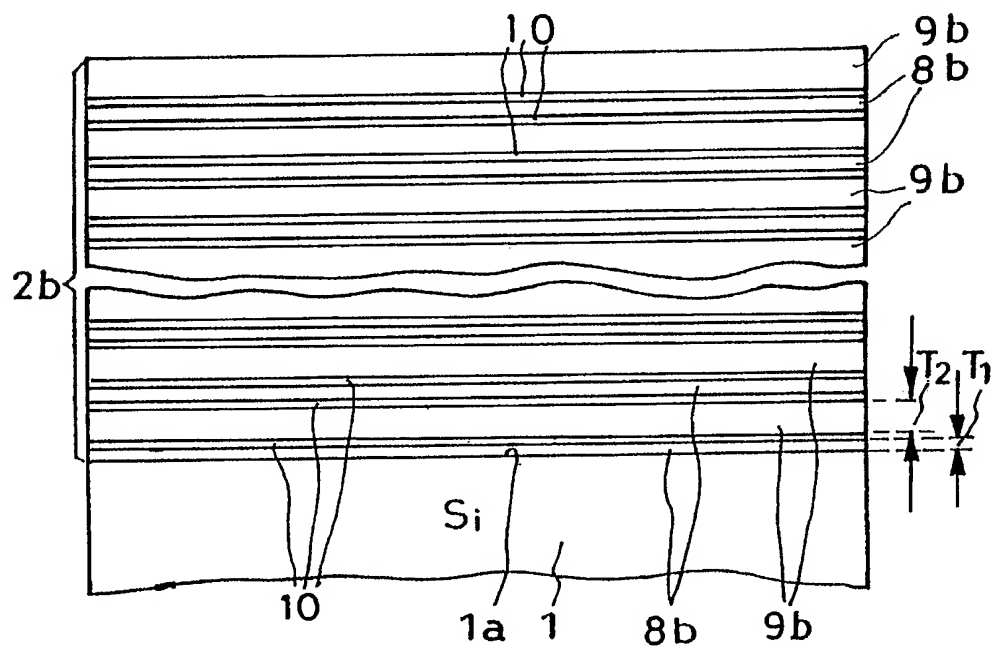
【図 2】



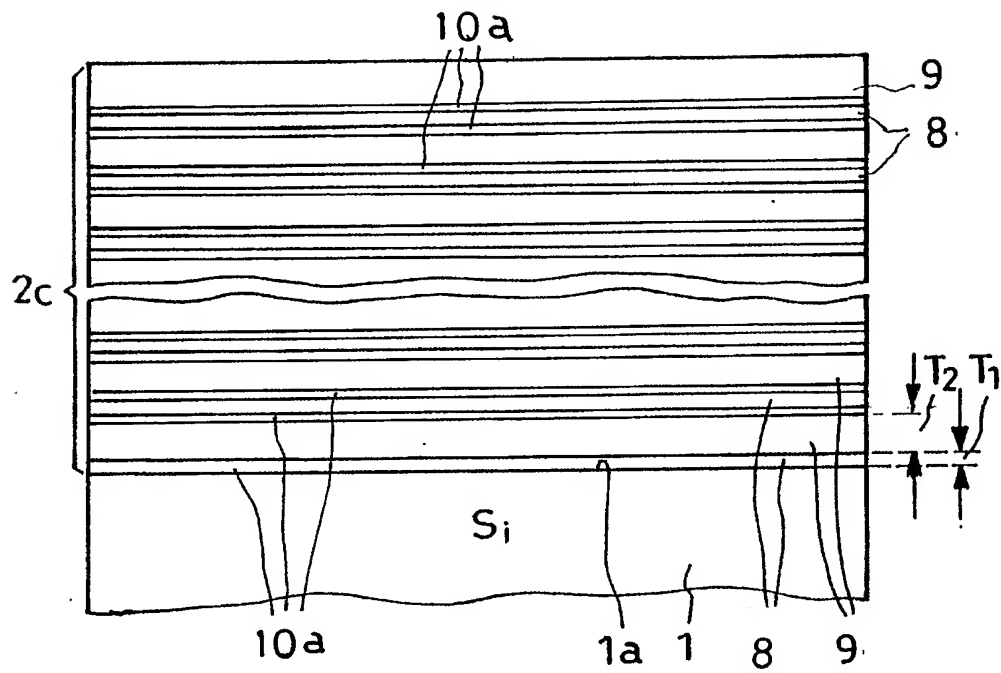
【図 5】



【図 6】



【図 7】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 GaN系化合物半導体装置の低コスト化及び特性向上が困難であった。

【解決手段】 シリコンから成る基板1の上にAlNから成る第1の層8とp型GaNから成る第3の層10と第2の層9とを交互に複数積層した構造のバッファ層2を設ける。バッファ層2の上にHEMT素子用の窒化ガリウム系半導体領域3を形成する。第3の層10の厚みを0.5～50nmとする。第3の層10は2次元電子ガスの発生を抑制する効果を有する。これにより、バッファ層2の低抵抗化を防ぐことができる。

【選択図】 図1

特願 2 0 0 3 - 0 1 0 1 6 8

ページ : 1/E

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 1 0 6 2 7 6]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 3 1 日

[変更理由]

新規登録

住 所

埼玉県新座市北野 3 丁目 6 番 3 号

氏 名

サンケン電気株式会社